4 ピンホール視点変換アイリスを用いた単眼ステレオ計測

森上 雄太^{*1}, 中山 裕太^{*2}, 高木 健^{*1}, 石井 抱^{*1}

Monocular stereo measurement using four-pinhole viewpoint switching iris

Yuta MORIUE^{*1}, Yuta NAKAYAMA^{*2}, Takeshi TAKAKI^{*1} and Idaku ISHII^{*1}^{*1,*2} Department of System Cybernetics, Hiroshima University
1-4-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8527, Japan

Received 31 July 2014

Abstract

This paper describes a monocular stereo system that can switch its viewpoint hundreds of times of more in a second using a four-pinhole viewpoint switching iris mechanism. Our system can measure the three-dimensional information of a moving object correctly using two different viewpoint images, which are selected from the four switched viewpoint images in a short interval using a four-pinhole viewpoint switching iris mechanism, corresponding to the moving direction of the object. Using a prototype of monocular stereo system that consists of the four-pinhole viewpoint switching iris mechanism and an offline high-speed video camera, we verified its effectiveness in monocular stereo measurement by performing several experiments of moving objects.

Key words : Viewpoint switching iris, Monocular stereo, 3-D image acquisition, High-frame-rate video analysis

1. は じ め に

ステレオ画像処理は複数の視点画像から三次元計測を行うセンシング技術であり、古くから様々な研究が行われている (Dhond and Aggarwal, 1989)(Brown, et al., 2003)(Woodfill, et al., 2007) . 画像の取得方法で大きく分けると、複数のカメラから空間的に複数の視点画像を取得する多眼ステレオ法 (Okutomi and Kanade, 1993)(Kanade, et al., 1996)(Woodfill, et al., 2004) とカメラ 1 台を移動させて時間的に複数の視点画像を取得するモーションステレオ法 (Weng, et al., 1989)(Sandini and Tistarelli, 1990)(Davision, 2003) がある. モーションステレオ法はカメラ 1 台であるため、多眼ステレオ法と比べてシステムの小型化が可能な一方で、異なる時刻で撮影された画像を使用するため運動する計測対象には同期ずれによる誤差が発生する. そのため、これまで開発された多くの単眼ステレオシステムの適用範囲は静止した対象や環境に対する三次元計測に限定されている. 近年ではモーションステレオ法の一つとして、レンズのアイリス孔のパターンを変化させて複数の視点画像を取得する単眼ステレオシステム (Adelson and Wang, 1992)(Amtoun and Boufama, 2003)(Liang, et al., 2008) が報告され、森上らは秒間 1000 回以上での視点切替えを可能とする 2 ピンホール視点変換アイリスと高速ビデオカメラを組み合わせた単眼ステレオシステム (森上他, 2010) を開発し、左右視点の同期ずれを 1/1000 s 以下に抑えることにより、移動する対象の三次元計測を可能とした.

本論文では、この 2 ピンホール視点変換アイリスに基づく単眼ステレオ法に改良を加え、左右方向だけではなく垂直方向にもアイリス孔を増設した 4 ピンホール視点変換アイリスを導入し、上下左右の視点画像から、計測対象の運動方向に対応した形で適応的に選択された 2 視点画像に基づく三次元計測を行う単眼ステレオ法を提案

Fig. 1 Two-pinhole viewpoint switching iris.

Fig. 2 Camera model for two-pinhole viewpoint switching iris

する．2章では，2ピンホール視点変換アイリスに基づく単眼ステレオ計測の原理を説明し，移動対象に対する計測における問題点を考察する．3章では，試作した4ピンホール視点変換アイリスと高速ビデオカメラを組み合わせた単眼ステレオシステムを述べ，視点画像のフレーム自動選択も含めて，4ピンホール視点変換アイリスのための単眼ステレオ法を提案する．4章では，運動対象に対して試作システムを用いた三次元計測実験を行い，左右視点画像のみを用いたステレオ計測結果と比較することにより，本論文で提案する4ピンホール視点変換アイリスを用いた単眼ステレオ法の有効性を検証する．

2. 視点変換アイリス

2.1 2ピンホール視点変換アイリス

最初に，2ピンホール視点変換アイリスに基づく単眼ステレオ計測原理について説明する．森上らが開発した2ピンホール視点変換アイリス(森上他, 2010)では，図1のように2つのアイリス孔上にスリット板を高速回転させ，アイリス孔の位置を機械的に高速に切り替えることにより，図2で示す2つの異なる視点を持つ仮想的なカメラを配置することと等価とできるため，単眼でのステレオ計測を可能とする．図2(a)のように2つのピンホール位置がイメージセンサ面から f だけ離れた平面(以降ではアイリス面と呼ぶ)に配置され，レンズの焦点面からアイリス面までの距離を F ，アイリス孔がレンズの光軸から距離 d だけ離して配置された場合，図2(b)のように実際のレンズ光軸に対して角度 $\phi = \tan^{-1}(d/F)$ をなす2つのカメラを仮想的に配置することと等価となる．カメラ1で観測された画素位置 (x_1, y_1) ，カメラ2で観測された画素位置 (x_2, y_2) が対応づけられれば，三角測量に基づき計測対象の三次元位置 (X, Y, Z) がステレオ計測可能となる．2ピンホール視点変換アイリスは，レンズ画角による視野制限やアイリス孔形状に依存して光量が絞られる点がある一方で，視点の移動に伴う動きボケを発生することなく瞬間的に視点を大きく動かすことができるため，1000回/秒以上といった高速な視点切替を可能としている(森上他, 2010)．また，従来の多眼ステレオシステムに比べて，1台のカメラを設置するだけでステレオ計測を可能とするため，ステレオ視における基線長が短いマイクロ観察系といった，カメラを物理的に複数台配置することが難しい場面において大きな利点を持つ．

Fig. 3 Deviation errors in observing a moving object using two-pin-hole viewpoint switching iris

2.2 移動対象計測における問題点

2 ピンホール視点変換アイリスを用いた単眼ステレオシステムでは、左右視点画像の同期ずれを $1/1000$ s 以下に抑えることにより、移動する対象の三次元計測が可能となったが、微小時間の同期ずれを完全に解決されたわけではなく、撮影タイミングの異なる 2 枚の画像を用いる点において従来のモーションステレオ法と同様に対象の運動方向に応じた形で同期ずれの影響が存在する。ここで 2 ピンホール視点変換アイリスを用いた単眼ステレオシステムの同期ずれを Δt とし、仮想的に配置されたカメラにおいて、カメラ 1 で時刻 t 、カメラ 2 で時刻 $t + \Delta t$ において画像を取得する場合を考える。図 3(a) のように計測対象が 2 つのアイリス孔を結ぶ基線と同一方向に移動し、カメラ 2 の画像において速度 v で移動する場合、カメラ 2 の画像における計測対象は、本来カメラ 1 の画像と照合すべき時刻 t における位置から、基線方向に $v\Delta t$ だけずれる。この基線方向のずれは、左右画像の視差計算における誤差に直結し、対象速度や同期ずれの増加につれ三次元計測精度を悪化させる主因となる。一方で図 3(b) のように計測対象が基線に対し垂直方向に移動する場合、カメラ 2 の画像における計測対象は、本来カメラ 1 の画像と照合すべき時刻 t における位置から、基線の垂直方向に $v\Delta t$ だけずれる一方で、基線方向のずれはほとんどない。この場合、エピポーラ線からの逸脱を考慮した形で、探索領域を広げた形で左右画像のマッチングを行う必要があるものの、基線方向のずれはほとんどないため、計算される三次元精度は大きく悪化しない。

このように 2 ピンホール視点変換アイリスを用いた単眼ステレオ計測では、ステレオ画像における同期ずれを抑えた場合でも、2 ピンホール視点変換アイリスが単眼ステレオ計測を可能とする最小数のピンホールしか持たないことにより、固定された 2 つのピンホール位置と対象の運動方向の位置関係に強く依存した形で三次元計測精度が変化する。本論文ではこの問題に対し、ステレオ画像対の基線方向と対象の運動方向の関係により計測精度が大きく変化するを考慮し、アイリス孔を左右だけではなく、上下にも増やすことにより、単眼ステレオ計測に対して冗長な数のピンホールを持った 4 ピンホール視点変換アイリスを導入し、計測対象の運動方向に応じた形で左右視点画像や上下視点画像を適応的に選択することにより、運動対象に対する三次元計測誤差が抑えられる単眼ステレオ計測を実現する。

3. 4 ピンホール視点変換アイリスを用いた単眼ステレオ計測

3.1 システム構成

本論文では、4 ピンホール視点変換アイリスと高速カメラから構成される単眼ステレオシステムを構築した。図 4 にシステムの構成及び外観を示す。

レンズと高速カメラのイメージセンサの間に配置される 4 ピンホール視点変換アイリスは、4 つの固定されたア

Fig. 4 Monocular stereo system using a four-pinhole viewpoint switching iris mechanism

Fig. 5 Iris hole selection for viewpoint switching

Fig. 6 Captured images in switched viewpoints

アイリス孔がある金属アパーチャ板, 3つのスリット窓がある円形の回転スリット板, スリット板を回転するためのプーリー機構及びモーターから構成され, アイリス孔及びスリット窓位置以外は, 2ピンホール視点変換アイリス(森上他, 2010)と同様な仕様を持つ. 金属アパーチャ板には, 4つのアイリス孔がレンズの光軸からそれぞれ上下左右方向に $d_0 = 8.0 \text{ mm}$ 離れた位置に配置されている. アイリス孔の直径はいずれも 1.5 mm である. 回転スリット板では, 直径 96 mm の金属円板に角度 18° を持つ扇形のスリット窓を3つ等間隔に配置する. 回転スリット板により複数のアイリス孔が同時に開放されることはなく, 120° 回転する毎に図5のように上→左→下→右の順にアイリス孔を交互にシャッターリングし, 12視点/回転の切り替えを可能とする. 回転スリット板は, プーリー機構を介して, DCモータ(マクソン社 EC40)により 100 rps まで高速回転できるため, 1秒あたり最大1200回の視点切り替えが可能である. レンズにはモリテックス社の MTE-55を用い, アイリス部分を切断した上で, レンズの光軸がスリット板の回転中心となるように4ピンホール視点変換アイリスを挿入した.

高速カメラにはフォトン社の FASTCAM MH4-10Kを使用した. このカメラでは, 画素ピッチ $10 \mu\text{m}$ の CMOS イメージセンサにより, 空間解像度 512×512 画素の8ビット濃淡画像をフレームレート 2000 fps で撮影可能である. 4ピンホール視点変換アイリスを通して撮影される画像は, 図7で示す4つの仮想カメラモデルで表現されるカメラ系で撮影された画像と等価となる. 図6は, 文字列が印刷された表面を持つ段差のある対象を $Z = 180 \text{ mm}$ 付近に配置した場合について, 4ピンホール視点変換アイリスの上下左右視点を切り替えた場合に撮影された画像例を示す.

本システムは, 焦点距離が 55 mm のレンズを用いて, カメラから $15 \text{ cm} \sim 20 \text{ cm}$ 離れた位置にある, 数 cm オーダーの比較的小さな対象に対するマクロ撮影における単眼ステレオ計測に適した形に設計しており, イメージセンサからアイリス面までの距離を $f = 74.7 \text{ mm}$, レンズ焦点面からアイリス面までの距離を $F = 208.7 \text{ mm}$ に設定した. このとき, 4ピンホール視点変換アイリスを介して, 図7に示す仮想カメラモデルに対応した形で, 実際の

Fig. 7 Virtual camera model of four-pinhole viewpoint switching iris

レンズ光軸に対して $\phi = \pm 2.2^\circ$ の角度をなすカメラを上下左右に配置した場合と等価になり、カメラを物理的に複数台配置することが難しい光軸間隔での異なる視点からの画像を撮影可能とした。

3.2 計測アルゴリズム

本論文では、4ピンホール視点変換アイリスを通してオフラインで獲得された高フレームレート映像に対して、(1) 動画からステレオ画像対を選択する処理、(2) ステレオ画像対に基づき三次元距離を計算する処理を行うことにより単眼ステレオ計測を実現する。以下にこれらの単眼ステレオ計測アルゴリズムを記述する。

3.2.1 ステレオ画像対の選択

2.2節で説明したとおり、視点変換アイリスを用いた単眼ステレオ計測では、ステレオ画像における同期ずれを微小に抑えた場合でも、ステレオ計測に用いる画像対を計測対象の運動方向に対してどのように選択するかで三次元計測精度が変化する。ここでは、画面内における計測対象の運動速度を計測し、その運動方向に応じた形で左右視点画像や上下視点画像をステレオ画像対として適応的に選択した上で、運動対象に対する三次元計測誤差を抑えた単眼ステレオ計測を可能とした。

(1) 特徴点抽出

入力画像からの特徴点抽出には、SURF (Speeded-Up Robust Features) (Herbert, et al., 2008) を用いる。SURF は画像スケール、回転、輝度変化、オクルージョンに対してロバストな特徴量であり、コンピュータビジョン分野で対象認識や SLAM 等の場面で多用されている。時刻 t における入力画像 $I(x, t)$ に対して、SURF 計算における Hessian 行列の近似行列式が閾値 ϕ_S を超える画素位置を特徴点とし、 $K(t)$ 個の特徴点 $^S x_i(I(x, t)) = (^S x_i(t), ^S y_i(t))$ ($i = 1, \dots, K(t)$) が抽出されたとする。本論文では、これらの特徴点抽出を OpenCV ライブラリに提供された SURF 関数により行い、それぞれの特徴点 $^S x_i(I(x, t))$ に対し、64 次元の特徴ベクトル $F(^S x_i(I(x, t))) (\in R^{64})$ が計算されるものとした。

(2) 特徴点の平均速度計算

画像内の対象速度を計算するために、時刻 t における抽出された特徴点の平均速度 $v(t)$ を計算する。

$$v(t) = \frac{1}{\Delta t} (g(t) - g(t - \Delta t)) \quad (1)$$

ここで、 Δt は入力画像のフレーム間隔であり、 $g(t)$ は時刻 t において抽出された特徴点の平均位置である。

$$g(t) = \frac{1}{K(t)} \sum_{i=1}^{K(t)} ^S x_i(I(x, t)) \quad (2)$$

(3) 上下左右視点画像の取得

4ピンホール視点変換アイリスにより画像における視点が切り替わる瞬間、計測対象自体の運動により生じた移

動速度に比べて、特徴点の移動速度は極めて大きな値をとる。そこで特徴点の平均速度の大きさ $|\mathbf{v}(t)|$ がある閾値 v_θ より大きい場合を視点切替の発生時刻とし、 $\mathbf{v}(t)$ の方向に応じ、 $v_x(t) < -v_\theta/\sqrt{2}$, $v_y(t) > v_\theta/\sqrt{2}$ となる時刻を右から上に視点が切り替わった時刻 $t = T_T$ とする。視点が反時計回りに上、左、下、右の順に切り替わることに対応して、 $t = T_T$ 以降の視点切替時刻 $t = T_L, T_B, T_R, T'_T$ は、順に、上から左、左から下、下から右、右から上 (2 回目) に視点が切り替わった時刻とする。検出された視点切替時刻に基づき、入力画像 $I(\mathbf{x}, t)$ から、図 7 にある上、下、左、右の仮想カメラの配置に対応した異なる視点の画像 $I_T(\mathbf{x}), I_L(\mathbf{x}), I_B(\mathbf{x}), I_R(\mathbf{x})$ が取得される。

$$I_T(\mathbf{x}) = I(\mathbf{x}, T_T), I_L(\mathbf{x}) = I(\mathbf{x}, T_L), I_B(\mathbf{x}) = I(\mathbf{x}, T_B), I_R(\mathbf{x}) = I(\mathbf{x}, T_R) \quad (3)$$

(4) ステレオ画像処理に使用する画像対の選択

2.2 節で述べたように、計測対象がステレオ画像対の基線方向に動く場合に、単眼ステレオ計測における同期ずれが大きくなる。そこで、左右方向に移動している場合は上下視点画像を、上下方向に移動している場合は左右視点画像をステレオ画像処理に使用する画像対とすることで計測誤差を抑えることを考える。計測対象の移動方向は同一視点画像での特徴点の速度方向から判別できるため、ここでは上視点における速度 $\mathbf{v}^o = (v_x^o, v_y^o)$ に基づき、上下方向、左右方向いずれの速度成分が大きいかを比較して、次のようにステレオ画像対を決定する。

$$I_1(\mathbf{x}) = I_L(\mathbf{x}), I_2(\mathbf{x}) = I_R(\mathbf{x}) \quad (|v_y^o| > |v_x^o|) \quad (4)$$

$$I_1(\mathbf{x}) = I_T(\mathbf{x}), I_2(\mathbf{x}) = I_B(\mathbf{x}) \quad (\text{otherwise}) \quad (5)$$

ここで上視点における速度 $\mathbf{v}^o$ は $t = T_T, T'_T$ における画像に基づき次のように計算される。

$$\mathbf{v}^o = \frac{1}{T'_T - T_T} (\mathbf{g}(T'_T) - \mathbf{g}(T_T)) \quad (6)$$

3.2.2 ステレオ画像対に基づく三次元距離計算

選択されたステレオ画像対に対して、特徴点マッチングによる対応点検索に基づく視差計算を用いた一般的なステレオ計測法により、対応づけされた特徴点群に対して三角測量に基づき三次元位置を計算する。

(1) 特徴点マッチングによる対応点検索

画像 $I_1(\mathbf{x})$ における特徴点 $\mathbf{s}_{x_i^1} = (s_{x_i^1}^1, s_{y_i^1}^1) = \mathbf{s}_{x_i}(I_1(\mathbf{x}))$ ($i = 1, \dots, K^1$) は、画像 $I_2(\mathbf{x})$ における特徴点 $\mathbf{s}_{x_i^2} = (s_{x_i^2}^2, s_{y_i^2}^2) = \mathbf{s}_{x_i}(I_2(\mathbf{x}))$ ($i = 1, \dots, K^2$) のうち、ステレオ画像対におけるエピソード拘束を考慮した検索範囲 $N(\mathbf{s}_{x_i^1})$ に存在する特徴点に対してマッチングを行う。 K^1, K^2 は、それぞれ画像 $I_1(\mathbf{x}), I_2(\mathbf{x})$ における特徴点の数である。ここで、画像 $I_1(\mathbf{x}), I_2(\mathbf{x})$ における特徴点 $\mathbf{s}_{x_i^1}, \mathbf{s}_{x_i^2}$ における 64 次元特徴ベクトルを $\mathbf{F}_i^1 = \mathbf{F}(\mathbf{s}_{x_i}(I_1(\mathbf{x}))), \mathbf{F}_i^2 = \mathbf{F}(\mathbf{s}_{x_i}(I_2(\mathbf{x})))$ とする。

マッチング処理では、64 次元ベクトルに基づいた 2 つの特徴点間の距離を計算する。

$$d(\mathbf{F}_i^1, \mathbf{F}_j^2) = |\mathbf{F}_i^1 - \mathbf{F}_j^2| \quad (i = 1, \dots, K^1, \mathbf{x}_j^2 \in N(\mathbf{s}_{x_i^1})) \quad (7)$$

特徴点 $\mathbf{s}_{x_i^1}$ に対する検索範囲 $N(\mathbf{s}_{x_i^1})$ は、 $I_1(\mathbf{x})$ が撮影されてから $I_2(\mathbf{x})$ が撮影されるまでの間に、計測対象の移動に対応して特徴点 $\mathbf{s}_{x_i^1}$ に対するエピソード線が移動することを考慮した次のような範囲とする。

$$N(\mathbf{s}_{x_i^1}) = \begin{cases} \{(x, y) \mid |y - s_{y_i^1}^1 + \frac{v_y^o}{T_R - T_L}| \leq \delta\} & (\text{when } I_1(\mathbf{x}) = I_L(\mathbf{x}), I_2(\mathbf{x}) = I_R(\mathbf{x})) \\ \{(x, y) \mid |x - s_{x_i^1}^1 + \frac{v_x^o}{T_B - T_T}| \leq \delta, \forall y\} & (\text{when } I_1(\mathbf{x}) = I_T(\mathbf{x}), I_2(\mathbf{x}) = I_B(\mathbf{x})) \end{cases} \quad (8)$$

本論文では、 512×512 画素の画像に対して $\delta = 5$ 画素、つまり $I_1(\mathbf{x}) = I_L(\mathbf{x}), I_2(\mathbf{x}) = I_R(\mathbf{x})$ のとき 512×11 画素、 $I_1(\mathbf{x}) = I_T(\mathbf{x}), I_2(\mathbf{x}) = I_B(\mathbf{x})$ のとき 11×512 画素の範囲を特徴点探索範囲とした。類似した特徴点とのミスマッチングを防ぐため、画像 $I_1(\mathbf{x})$ における特徴点 $\mathbf{s}_{x_i^1}$ に対応する画像 $I_2(\mathbf{x})$ における特徴点 $\mathbf{s}_{x_i^2}$ は、探索範囲 $N(\mathbf{s}_{x_i^1})$ の中で最も距離が小さい特徴点 $\mathbf{s}_{x_{m_1}^2}$ 及びその次に距離が小さい特徴点 $\mathbf{s}_{x_{m_2}^2}$ に対する次の距離比がある閾値 θ_d より大きいときのみ選択されるものとした。

$$\frac{d(\mathbf{F}_i^1, \mathbf{F}_{m_1}^2)}{d(\mathbf{F}_i^1, \mathbf{F}_{m_2}^2)} > \theta_d, \quad (9)$$

ここで、 $\mathbf{F}_{m_1}^2, \mathbf{F}_{m_2}^2$ は、特徴点 $\mathbf{s}_{x_{m_1}^2}, \mathbf{s}_{x_{m_2}^2}$ における 64 次元特徴ベクトルである。

上記の条件を満たした画像 $I_1(\mathbf{x})$ における特徴点 $\mathbf{s}_{x_i^1}$ と画像 $I_2(\mathbf{x})$ における $\mathbf{s}_{x_i^2} = \mathbf{s}_{x_{m_1}^2}$ を一対の対応点とみなす。

(2) 三角測量に基づく三次元位置計算

本論文における単眼ステレオシステムは図7で記述された4ピンホールカメラモデルと等価となる。この場合、一般的なステレオ計測と同じように、2つの仮想カメラの幾何学的関係に基づく連立方程式を最小二乗法により解くことにより、対応づけされた特徴点対に対応した三次元特徴点位置を計算することができる。(佐藤, 1999) ここでは、原点を4つのアイリス孔の中間点とし、Z軸がレンズ光軸と一致するXYZ座標系における三次元位置を計算する。

ステレオ画像対として左右視点画像が選択された場合、ステレオ特徴点対 $s_{x_i}^1, s_{x_i}^2$ に対応した三次元位置 (X_i, Y_i, Z_i) は次の連立方程式の解として計算される。

$$\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} = d \cdot Q_{LR}^+ \begin{pmatrix} s_{x_i}^1 \sin \phi - f \cos \phi \\ s_{y_i}^1 \sin \phi \\ s_{x_i}^2 \sin \phi + f \cos \phi \\ s_{y_i}^2 \sin \phi \end{pmatrix} \quad (10)$$

ここでイメージセンサの中心はレンズ光軸に対応するものとし、アイリス孔とレンズ光軸の距離 $d = 8.0 \text{ mm}$ は、レンズ焦点からアイリス板までの距離 $F = 208.7 \text{ mm}$ に比べて非常に小さいものと仮定した。 Q_{LR}^+ は Q_{LR} の一般化逆行列を指し、 Q_{LR} は選択されたカメラ視野とレンズ光軸の間の角度 $\phi = \tan^{-1}(d/F) = 2.20^\circ$ を用いて次のように記述される 3×4 行列である。

$$Q_{LR} = \begin{pmatrix} -s_{x_i}^1 \sin \phi - f \cos \phi & 0 & -s_{x_i}^1 \cos \phi - f \sin \phi \\ -s_{y_i}^1 \sin \phi & -f & -s_{y_i}^1 \cos \phi \\ s_{x_i}^2 \sin \phi - f \cos \phi & 0 & -s_{x_i}^2 \cos \phi + f \sin \phi \\ s_{y_i}^2 \sin \phi & -f & -s_{y_i}^2 \cos \phi \end{pmatrix} \quad (11)$$

ステレオ画像対として上下視点画像が選択された場合も同様な形で、ステレオ特徴点対 $s_{x_i}^1, s_{x_i}^2$ に対応した三次元位置 (X_i, Y_i, Z_i) を計算する。

$$\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} = d \cdot Q_{TB}^+ \begin{pmatrix} s_{x_i}^1 \sin \phi \\ s_{y_i}^1 \sin \phi - f \cos \phi \\ s_{x_i}^2 \sin \phi \\ s_{y_i}^2 \sin \phi + f \cos \phi \end{pmatrix} \quad (12)$$

ここで Q_{TB}^+ は以下に示す 3×4 行列 Q_{TB} の一般化逆行列である。

$$Q_{TB} = \begin{pmatrix} -f & s_{x_i}^1 \sin \phi & s_{x_i}^1 \cos \phi \\ 0 & s_{y_i}^1 \sin \phi - f \cos \phi & s_{y_i}^1 \cos \phi + f \sin \phi \\ -f & -s_{x_i}^2 \sin \phi & s_{x_i}^2 \cos \phi \\ 0 & -s_{y_i}^2 \sin \phi - f \cos \phi & s_{y_i}^2 \cos \phi - f \sin \phi \end{pmatrix} \quad (13)$$

全ての特徴点対に対してこれらの三角測量に基づく三次元位置計算を行うことにより、構築した単眼ステレオシステムの出力となる三次元特徴点群が求められる。

特に ϕ が小さいとして、基線長 $2d$ の平行ステレオシステムとして近似できる場合、式(10), (12)で求められた奥行き計算における誤差 ΔZ_i は、選択された画像対を用いた視差 $p_i = s_{x_i}^1 - s_{x_i}^2$ または $p_i = s_{y_i}^1 - s_{y_i}^2$ を計算する際の誤差 $\Delta p_i = \Delta p_i^d + \Delta p_i^v$ を用いて次のように記述できる。

$$\left| \frac{\Delta Z_i}{Z_i} \right| \approx \frac{Z_i}{2d \cdot f} |\Delta p_i^d + \Delta p_i^v| \quad (14)$$

ここで Δp_i^d はイメージセンサの画素ピッチ δ に依存した離散化誤差、 Δp_i^v は計測対象の運動に伴う同期誤差である。座標 (X_i, Y_i, Z_i) において速度 V で X または Y 方向に計測対象が運動する場合、ステレオ画像対の時間差 ΔT の間にその像がイメージセンサ面上で移動する距離 $\Delta p_i^v = V \Delta T \cdot f / Z_i$ が同期誤差となる。

本論文で構築した単眼ステレオシステムは、基線長 $16.0 \text{ mm} (= 2d_0)$ 、焦点距離 $74.7 \text{ mm} (= f)$ の平行ステレオシステムとして近似される。 $Z = 180 \text{ mm}$ で運動する対象の X, Y 方向運動成分の最小値が $V \text{ mm/s}$ の場合、離散化誤差を1画素つまり $\Delta p_i^d = 10 \text{ } \mu\text{m}$ 、ステレオ画像対の時間差を $\Delta T = 5 \text{ ms}$ とすると、奥行き誤差は $0.056V \pm 0.27 \text{ mm}$ となる。

Fig. 8 Depth measurement for stationary objects

4. 検 証 実 験

4 ピンホール視点変換アイリス機構の有効性を示すために、構築した単眼ステレオシステムを用いて、様々な条件で配置した計測対象に対する三次元計測実験を行った結果を示す。実験では、4 ピンホール視点変換アイリスの視点切替レートを 400 Hz に設定し、高速カメラでは 512×512 画素画像をフレームレートで 2000 fps で取得した。三次元計測データの出力レートは 100 fps、ステレオ計測に用いる使用する 2 つの異なる視点を持つステレオ画像対の時間差は 5 ms となる。また、SURF に基づく特徴点抽出における閾値 θ_H を 1000、視点切替判定のための閾値 θ_v を 10 画素/s、有効なマッチング対応点を決定する閾値 θ_d を 0.7 に設定した。計測対象はカメラから 15 cm～20 cm 離れた場所に配置するものとし、照明として計測対象から 30 cm 離れた位置に 150 W メタルハライド光源を 2 台配置した。なお、計測対象が静止している場合、座標位置 $(X, Y, Z) = (0, 0, 180 \text{ mm})$ における三次元計測誤差は、X 方向 1.2 mm、Y 方向 1.2 mm、Z 方向 0.4 mm となる。

4.1 静止対象の奥行き計測

最初に、静止した対象の三次元位置を計測した結果を示す。計測対象には、図 8(a) で示す黒い紙に印刷された直径 2 mm の白色のリングパターンを用いた。このパターン面の奥行きを $Z = 160 \text{ mm}$ から 190 mm までおよそ 5 mm 間隔で準静的に動かした場合、計測された奥行きと実際の値の関係を図 8(b) に示す。図 8(b) では上下視点を選択した場合の計測結果と左右視点を選択した場合の計測結果を示した。なお、左右視点を選択した場合の単眼ステレオ計測は、これまでの 2 ピンホール視点変換アイリスを用いた単眼ステレオ計測と等価である。計測結果としては、有効となる複数の対応づけされた特徴点に対して計算された奥行きの平均値をプロットした。対象が静止している場合には、計測値と実際の奥行きが 0.4 mm 以内のずれとなっており、2 ピンホール視点変換アイリスを用いた単眼ステレオ計測と同様な精度で単眼でのステレオ計測が正しく実現されていることがわかる。

4.2 移動対象に対する奥行き計測誤差

次に計測対象の移動速度や方向が 4 ピンホール視点変換アイリスに基づく単眼ステレオ計測に対してどのような影響を与えるかを検証した。計測対象は、4.1 節と同じリングパターンを用いた。実験では、リニアステージにより計測対象を X 軸、Y 軸、Z 軸の 3 方向に対し、速度 -100 mm/s から 100 mm/s まで 20 mm/s 刻みで動かした。座標位置 $(X, Y, Z) = (0, 0, 182 \text{ mm})$ を計測対象が通過したときの奥行きと実際の奥行きを比較したグラフを図 9 に示す。図 9 では、比較のため、2 ピンホール視点変換アイリスを用いた単眼ステレオ計測に相当する、常に左右視点画像をステレオ画像対として選択した場合について、ステレオ画像対の時間差を 5 ms とした場合と 40 ms とした場合の実測値を示した。

図 9 のグラフから、4 ピンホール視点変換アイリスを用いた単眼ステレオ計測による奥行きの計測値は、計測対象が X 方向、Y 方向、Z 方向のいずれの方向に移動する場合でも、 $Z = 182 \text{ mm}$ 前後となり、実際の奥行きとほぼ一致することがわかる。これに対し、時間差 5 ms の左右視点画像を用いた単眼ステレオ計測を用いた奥行きの計測値は、Y 方向や Z 方向に計測対象が移動する場合は実際の奥行きとほぼ一致する一方で、X 方向に計測対象が移動する場合はその移動速度の大きさに比例して実際の奥行きから逸脱しており、このような傾向は時間差 40 ms の左右視点画像を用いた単眼ステレオ計測でより顕著になることがわかる。例えば X 方向の移動速度が 100 mm/s の

Fig. 9 Depth measurement for moving objects

場合、奥行き値の計測誤差は、ステレオ画像対の時間差が 5 ms である 4 ピンホール視点変換アイリスを用いた単眼ステレオ計測では、0.1 mm となる一方で、時間差 5 ms、時間差 40 ms の左右視点画像を用いた単眼ステレオ計測では、それぞれ 3.4 mm, 24.5 mm であった。左右視点画像を用いた単眼ステレオ計測におけるこれらの計測誤差は、計測対象が X 方向へ移動する場合に、三角測量の精度に直結する視差方向に対する同期誤差を起因として生じたものである。例えば X 方向に 100 mm/s で移動する計測対象を座標位置 (0,0,182 mm) で観測した場合、時間差 5 ms、時間差 40 ms の左右視点画像における視差方向の同期ずれはそれぞれ 21 画素、166 画素であるのに対し、4 ピンホール視点変換アイリスを用いて時間差 5 ms の上下視点画像を適応的に選択した場合の視差方向の同期ずれは 1 画素以内であり、ステレオ画像対における視差方向の同期ずれが大きいほど視差に対する誤差の割合が大きくなる。なお、時間差 40 ms の左右視点画像による単眼ステレオ計測では、計測対象が Y 方向に移動する場合、ある速度を超えると同期ずれを起因として計測不能となる場合があった。これは左右視点画像の対応点の Y 座標の差が非常に大きくなり、探索不能となったためである。

これらのことから、4 ピンホール視点変換アイリスを用いた単眼ステレオ計測では、これまでの 2 ピンホール視点変換アイリスを用いた単眼ステレオ計測に比べて、計測対象が X 方向に運動する場合には上下視点画像を、Y 方向に運動する場合には左右視点画像を適応的に選択することにより、視差方向の同期ずれを小さくすることができ、対象移動に伴う奥行き方向の計測誤差を抑えることができることがわかる。

4.3 回転対象の三次元計測

次に 4.1 節と同一のリングパターンを計測対象として回転運動させた場合について、4 ピンホール視点変換アイリスに基づく単眼ステレオ計測により、その三次元座標の時間変化を計測した。なお、実験では回転面をレンズ光軸に対して 35° だけ傾けて設定し、回転半径を 2 mm として 1 秒間当たりおよそ 6 回転させた。図 10 に計測された三次元座標について、(a) X, Y, Z 座標の時間変化、(b) 三次元空間での軌跡、(c) X, Y 方向の速度と Z 座標計測誤差の時間変化を示す。これらの図では、2 ピンホール視点変換アイリスを用いた単眼ステレオ計測との比較のために、時間差 5 ms の左右視点画像のみまたは上下視点画像のみを用いた単眼ステレオ計測による三次元計測結果も示した。

これらの図から、X, Y 座標はいずれの場合も実際の値とほぼ一致する一方で、左右視点画像のみを選択した単眼ステレオ計測、4 ピンホール視点変換アイリスに基づく単眼ステレオ計測いずれの場合でも Z 座標には誤差が発生していることがわかる。Z 方向の計測誤差はいずれの場合も、時間差のあるステレオ画像対における同期ずれを起因としており、4.2 節のリニアスライダを用いた移動実験でも示したように、ステレオ画像対の基線方向の運動成分の大きさに比例した形で大きくなる。一方で、図 10(c) で見てわかるように、4 ピンホール視点変換アイリスを用いた単眼ステレオ計測における Z 方向の計測誤差は、左右視点画像または上下視点画像を用いた単眼ステレオ計測における誤差に比べ小さいものとなっている。これは、4 ピンホール視点変換アイリスを用いた単眼ステレオ計測では、ステレオ画像対の基線方向に対する同期ずれを小さくするように計測対象の速度方向に応じた形で、

(a) X, Y, Z coordinates for a rotating object

(b) 3-D Trajectory of a rotating object

(c) Velocity in the X direction and depth error

Fig. 10 Experimental results for a rotating object

ステレオ画像対を左右視点画像または上下視点画像を適応的に選択しているためであり、このことは4ピンホール視点変換アイリスを用いた単眼ステレオ計測における奥行き方向の計測誤差が、左右視点画像のみを用いた場合と上下視点画像のみを用いた場合の計測誤差のうち、より誤差の少ない値を採用していることからわかる。

これらの結果から、計測対象が例えば斜め方向といった、 X 方向、 Y 方向ともに速度成分を持つ運動を行う場合には、上下視点画像、左右視点画像を適応的に選択するだけでは、同期ずれを完全にキャンセルできない点はあるものの、2ピンホール視点変換アイリスを用いた単眼ステレオ計測に比べ、4ピンホール視点変換アイリスを用いた単眼ステレオ計測がより同期ずれを抑えた奥行き計測が実現されることがわかる。

4.4 運動対象の三次元形状計測

最後に運動対象について、4ピンホール視点変換アイリスを用いた単眼ステレオ計測により、その三次元形状を動画像として取得できることを確認した。計測対象には図11のように、表面に文字パターンがあり、段差4.0 mmを持つ階段形状を持つ大きさ7.0 mm×8.0 mmの対象を用いた。実験では、計測対象を奥行き $Z = 180$ mmから170 mmまでおよそ10 mmだけ奥行き方向手前に動かした。図12(a)に計測された三次元画像を0.1秒間隔の画像列として示す。図12(b)に $t = 0$ sにおいて計測された特徴点の三次元位置をプロットした。これらの図から、計測対象にある4.0 mmの段差が計測され、かつ奥行き方向の動きに対応して、三次元形状が画像情報として計測されていることがわかる。

5. お わ り に

本論文では、左右方向だけでなく上下方向にもアイリス孔を持つ4ピンホール視点変換アイリスを導入し、対象の運動速度に応じて左右上下の視点画像からステレオ画像対を適応的に選択する単眼ステレオシステムを構築し、

Fig. 11 A stair-shape object to be observed

Fig. 12 Experimental results for a moving stair-shape object

従来の2ピンホール視点変換アイリスを用いた単眼ステレオシステムに比べて、運動対象に対する同期ずれに伴う計測誤差を抑えた三次元計測が実現できることを、いくつかの実験結果を通して示した。今後は、計測対象の運動に斜め方向といった X 、 Y 方向共に速度成分がある場合に同期ずれが完全にキャンセルできない点を解決するために、さらなる多視点化及びその適応的な視点選択を可能とする視点変換アイリスの改良を考慮した単眼ステレオシステムの構築を行うとともに、これらのアルゴリズムのリアルタイム実装などを行う予定である。また、複数のカメラ設置による多眼ステレオ計測が困難なマイクロ観察への応用展開をめざし、システムの小型化を進めることで顕微鏡下などの微小光学系に対応したシステムを構築し、提案手法の有用性を検証する予定である。

文 献

- Adelson, E. H. and Wang, J. Y. A., Single lens stereo with a plenoptic camera, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.14, No.2 (1992), pp.99–106.
- Amtoun, M. and Boufama, B., Multibaseline stereo using a single-lens camera, Proceedings of International Conference on Image Processing (2003), pp.401–404.
- Brown, M. Z., Burschka, D. and Hager, G. D., Advances in computational stereo, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.25, No.8 (2003), pp.993–1008.
- Davision, A. J., Real-time simultaneous localisation and mapping with a single camera, Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision (2003), pp.1403–1410.
- Dhond, U. R. and Aggarwal, J. K., Structure from stereo – a review, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol.19, No.6 (1989), pp.1489–1510.
- Herbert, B., Andreas, E., Tinne, T. and Luc, V. G., SURF: speeded up robust features, Computer Vision and Image Understanding, Vol.110, No.3 (2008), pp.346–359.
- Kanade, T., Yoshida, A., Oda, K., Kano, H. and Tanaka, M., A stereo machine for video-rate dense depth mapping and its new applications, Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition Conference (1996), pp.196–202.
- Liang, C. K., Lin, T. H., Wong, B. Y., Liu, C. and Chen, H. H., Programmable aperture photography: multiplexed light

field acquisition, ACM Transactions on Graphics, Vol.27, No.3 (2008), pp.55:1–55:10.

森上雄太, 高木健, 石井抱, 視点変換アイリスを用いた単眼ステレオシステム, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.770 (2010), pp.232–239.

Okutomi, M. and Kanade, T., A multiple-baseline stereo, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.15, No.4 (1993), pp.353–363.

Sandini, G. and Tistarelli, M., Active tracking strategy for monocular depth inference over multiple frames, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.12, No.1 (1990), pp.13–27.

佐藤淳, コンピュータビジョン-視覚の幾何学-, コロナ社 (1999), pp.118–121.

Weng, J., Huang, T. S. and Ahuja, N., Motion and structure from two perspective views: algorithms, error analysis, and error estimation, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.11, No.5 (1989), pp.451–476.

Woodfill, J. I., Buck, R., Jurasek, D., Gordon, G. and Brown, T., 3D vision: developing an embedded stereo-vision system, IEEE Computer, Vol.40, No.5 (2007), pp.106–108.

Woodfill, J. I., Gordon, G. and Buck, R., Tyzx deepsea high speed stereo vision system, Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop (2004), pp.41–48.

References

Adelson, E. H. and Wang, J. Y. A., Single lens stereo with a plenoptic camera, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.14, No.2 (1992), pp.99–106.

Amtoun, M. and Boufama, B., Multibaseline stereo using a single-lens camera, Proceedings of International Conference on Image Processing (2003), pp.401–404.

Brown, M. Z., Burschka, D. and Hager, G. D., Advances in computational stereo, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.25, No.8 (2003), pp.993–1008.

Davision, A. J., Real-time simultaneous localisation and mapping with a single camera, Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision (2003), pp.1403–1410.

Dhond, U. R. and Aggarwal, J. K., Structure from stereo – a review, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol.19, No.6 (1989), pp.1489–1510.

Herbert, B., Andreas, E., Tinne, T. and Luc, V. G., SURF: speeded up robust features, Computer Vision and Image Understanding, Vol.110, No.3 (2008), pp.346–359.

Kanade, T., Yoshida, A., Oda, K., Kano, H. and Tanaka, M., A stereo machine for video-rate dense depth mapping and its new applications, Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition Conference (1996), pp.196–202.

Liang, C. K., Lin, T. H., Wong, B. Y., Liu, C. and Chen, H. H., Programmable aperture photography: multiplexed light field acquisition, ACM Transactions on Graphics, Vol.27, No.3 (2008), pp.55:1–55:10.

Moriue, Y., Takaki, T. and Ishii, I., A monocular stereo system based on a viewpoint switching iris mechanism, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.76, No.770 (2010), pp.232–239 (in Japanese).

Okutomi, M. and Kanade, T., A multiple-baseline stereo, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.15, No.4 (1993), pp.353–363.

Sandini, G. and Tistarelli, M., Active tracking strategy for monocular depth inference over multiple frames, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.12, No.1 (1990), pp.13–27.

Sato, J., Computer vision -geometry of vision-, Corona Publishing (1999), pp.118–121 (in Japanese).

Weng, J., Huang, T. S. and Ahuja, N., Motion and structure from two perspective views: algorithms, error analysis, and error estimation, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.11, No.5 (1989), pp.451–476.

Woodfill, J. I., Buck, R., Jurasek, D., Gordon, G. and Brown, T., 3D vision: developing an embedded stereo-vision system, IEEE Computer, Vol.40, No.5 (2007), pp.106–108.

Woodfill, J. I., Gordon, G. and Buck, R., Tyzx deepsea high speed stereo vision system, Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop (2004), pp.41–48.